APPORT D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX AU SOL PAR LES EAUX DE PLUVIOLESSIVAGE SOUS DES PEUPLEMENTS DE *QUERCUS ILEX L.*, *QUERCUS LANUGINOSA LAMK.* ET *PINUS HALEPENSIS MILL* *

Maurice RAPP

Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques.
Section d'Eco-Pédologie R.C.P. 40 et Programme français du PBI **

RÉSUMÉ

L'auteur a étudié la composition en éléments minéraux (Na, K, Ca, Mg, P et N) des eaux de pluie avant et après passage à travers la frondaison de deux forêts de chêne vert, d'une forêt de chêne pubescent et d'un bois de pin d'Alep.

Il a constaté un enrichissement des pluies sous couvert qui contiennent respectivement 99, 47, 30 et 44 kg/ha/an d'éléments minéraux de plus que les pluies incidentes. Cet accroissement peut être dû à une récrétion foliaire ou à un lessivage de suspensions atmosphériques déposées préalablement sur la végétation.

Cet apport, ajouté à celui propre aux précipitations, constitue un gain important d'éléments biogènes pour le sol de l'écosystème, qui complète celui fourni par les cendres des litières annuelles.

Il existe aussi une relation entre la localisation géographique des stations et la teneur en sodium des eaux de pluie à découvert et sous les arbres.

SUMMARY

The chemical composition of rain, and the leaching of Na, K, Ca, Mg, P and N from the tree canopy was studied in four forests of the south of France.

99 and 47 kg/ha/year of these elements are leached from the canopy of two *Quercus ilex* L. stands, 30 from those of a *Quercus lanuginosa* Lamk. stand, and 44 from those of a *Pinus halepensis* Mill. forest.

* Ce travail recouvre une partie d'une thèse d'état ès Sciences Naturelles, enregistrée au C.N.R.S. sous le n° A.O. 2955.

** Adresse : BP 1018. 34 - Montpellier (France).

ŒCOL. PLANT.
GAUTHIER-VILLARS
IV, p. 71-92, 1969.

These amounts are very important in the biological turnover and add to the return of elements through the litter fall.

The author indicates a relation between the position of the sites in regard to the sea, the amount of sodium in rainwater, and the removal of this element from the canopy.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Niederschläge werden im Mittelmeereichenwald und in Aleppokieferbeständen hohe Nährstoffmengen zum Boden geführt.

Ein Teil von ihnen sind im Regenwasser selbst enthalten, der Zusatz wird von den Baumkronen abgewaschen. Dieser Teil beträgt jährlich 99 und 47 kg/ha, Na, K, Ca, Mg, P und N unter *Quercus ilex* L., 30 unter *Quercus lanuginosa* Lamk. und 44 unter *Pinus halepensis* Mill.

Die Natriumkonzentration im Regenwasser über und unter den Baumkronen nimmt mit der Entfernung der Bestände zum Meer ab.

INTRODUCTION

L'étude des quantités et de la nature des éléments minéraux et des produits organiques apportés au sol par les eaux de pluie après leur passage à travers le couvert forestier présente un intérêt double.

Par leur teneur en éléments biogènes dissous, les eaux de pluie représentent une source trophique importante pour les écosystèmes; importance encore accrue par le lessivage de substances déposées sur la végétation ou excrétées par les végétaux eux-mêmes.

Parallèlement au rôle des éléments minéraux dans le cycle biologique, les composés organiques lessivés à partir de la couronne des arbres ont une influence sur les processus pédogénétiques (BLOOMFIELD, 1964), ainsi que sur l'activité biologique et microbiologique des sols.

Aussi, le pluviolessivage a intéressé depuis longtemps les chercheurs, et a été étudié dans des forêts d'essences variées et sous toutes les latitudes. TAMM (1951, 1958) et OVINGTON (1954) l'ont analysé sous de nombreuses espèces, feuillues et résineuses d'Europe, WILL (1955) sous *Pinus radiata* de Nouvelle-Zélande. Parmi les travaux récents on peut citer DENAEYER DE SMET (1962, 1966) dans la forêt caducifoliée belge, CARLISLE (1966) sous *Quercus petraea* en Grande-Bretagne et MINA (1966) sous bouleau et sapin en U.R.S.S.

En région méditerranéenne, par contre, ce phénomène n'avait pas encore trouvé beaucoup d'intérêt, malgré le caractère particulier de la pluviométrie et de la végétation constituée essentiellement d'espèces xérophytiques à feuilles sempervirentes.

Dans ce travail, nous avons déterminé pendant plusieurs années, l'apport au sol d'éléments minéraux (Na, K, Ca, Mg, P et N) soit directement par l'inter-

médiaire des pluies, soit après leur passage à travers le feuillage de forêts de chêne vert (*Quercus ilex* L.), de chêne pubescent (*Quercus lanuginosa* Lamk.) et de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Rappelons que ce travail se situe dans le cadre d'un programme d'étude intégrée du fonctionnement de quelques écosystèmes méditerranéens (LOSSAINT 1967, ECKARDT 1967) qui fait partie du programme français du P.B.I.

STATIONS ET MÉTHODES D'ÉTUDE

1. LES STATIONS.

Les recherches ont été entreprises dans les mêmes stations que celles portant sur l'égouttement de la pluie (RAPP, ROMANE 1968). Elles ont été décrites par LOSSAINT (1967) et RAPP (1967). Il s'agit de deux peuplements de chêne vert appartenant au *Quercetum ilicis galloprovincialis* Br. Bl., dénommés la « Madeleine » et le « Rouquet » et d'une plantation de pin d'Alep, installée à Grabels au début du siècle. Nous y avons ajouté une quatrième station, constituée par une fûtaie de chêne pubescent, sise au hameau de Gabriac. Ces stations, localisées aux environs de Montpellier sont respectivement distantes de 4, 23, 17 et 37 km de la mer.

Le tableau 1 donne les principales caractéristiques des peuplements. Le recouvrement des couronnes a été évalué à 80 %. Les différents pluviomètres ont été placés sous des couronnes d'arbres pris au hasard.

TABLEAU 1

Caractéristiques dendrométriques des stations

Dendrometric characteristics of the sites

Stations	Madeleine	Rouquet	Gabriac	Grabels
Essence	*Quercus ilex*		*Quercus lanuginosa*	*Pinus halepensis*
Nombre d'arbres à l'hectare	527	1 440	362	660
Surface terrière moyenne en cm^2	797,2	269,5	787,4	373,3
Hauteur en mètres	15	11	18–21	10–12

2. Conditions climatiques.

Depuis le début des observations la pluviométrie a été variable d'une station à l'autre (Tabl. 2) et d'une année à l'autre (Fig. 1).

Deux faits retiennent particulièrement notre attention :

1. Elle augmente avec l'éloignement de la mer : les valeurs moyennes de trois ans passent de 477 mm à la Madeleine à 708 mm à Gabriac.

2. Les trois années de mesure recouvrent 3 types différents voir extrêmes de la pluviométrie de la région :

— 1966 caractérise le régime normal des alentours de Montpellier, pluies importantes au printemps et en automne, sécheresse estivale et hivernale.

— 1967 a été une année sèche, surtout à partir de mars. Les mois d'été et d'automne ont été particulièrement déficitaires.

— 1968 enfin, après un début d'année prolongeant la sécheresse de 1967, a été soumise à des précipitations importantes à partir d'avril. Juillet seul présente les valeurs habituelles de ce mois, et octobre a été plus sec que la normale.

Les précipitations sous forme de neige sont peu importantes dans la région. Pour l'ensemble de la période il y a eu 11 jours de neige.

Tableau 2

Pluviométrie à l'air libre dans les différentes stations (en mm de pluie).
Résultats d'observations hebdomadaires

The rainfall in the four localities during the period of observation

Année	Madeleine	Grabels	Rouquet	Gabriac
1966	560,7	606,4	680,6	
1967	292,8	557,4	474,9	655,1
1968	579,0	640,6	830,8	762,2
moyenne	477,5	601,5	662,1	708,6

Pour compléter ce bref aperçu sur la pluviosité, on peut signaler que les vents sont essentiellement des vents du Nord et d'Ouest. Les vents du Sud, qui proviennent de la Méditerranée, et qui peuvent jouer un certain rôle dans l'apport d'éléments minéraux d'origine marine, ne soufflent qu'entre 30 et 40 jours par an principalement d'avril à juin, parfois en septembre et octobre.

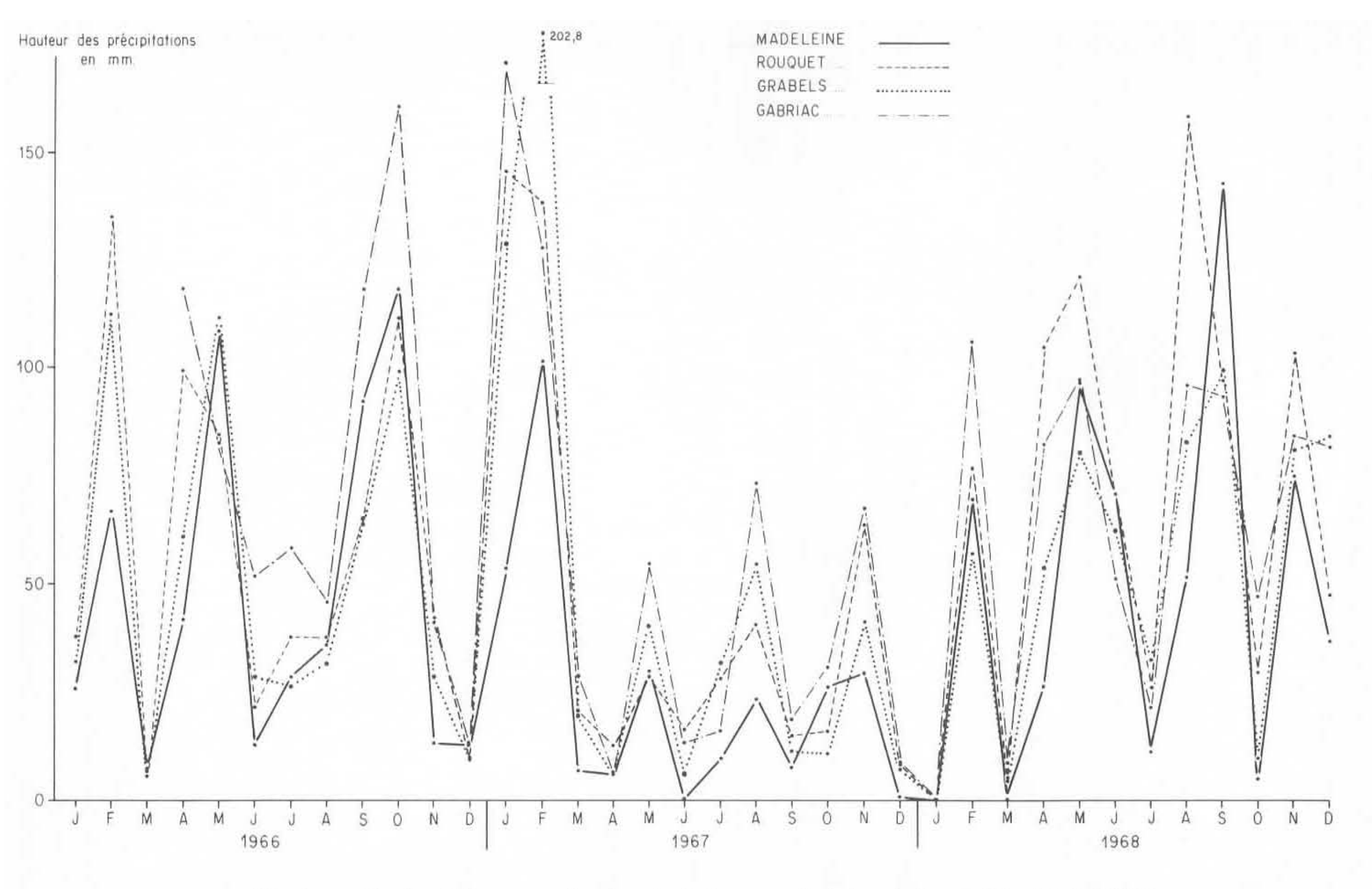


FIG. 1. — Pluviométrie mensuelle des 4 stations pendant les trois années d'observation.
The monthly rainfall at the 4 stations during the 3 years of observation.

Le tableau 3 indique la direction des vents enregistrés pendant les trois années d'observation à la station bioclimatique de Bel-Air à Montpellier.

Les vents sont susceptibles de contaminer l'atmosphère par des déchets d'origine essentiellement industrielle et humaine et polluer les pluies et la végétation, comme l'a montré GRUNERT (1964) qui a étudié ce mécanisme en détail. Dans le cas présent, le vent du Nord qui est le plus important, provient d'un arrière pays montagneux (les Cévennes), peu industrialisé. Seul le vent d'Ouest, relativement fréquent, peut produire une pollution à partir des raffineries de pétrole de Frontignan, ou des installations portuaires ou industrielles de Sète. Des contaminations locales se produisent à la Madeleine à partir des carrières et des salins de Villeneuve qui se trouvent à proximité de la station.

TABLEAU 3

Nombre de jours de vents de différentes origines enregistrés à la Station Bioclimatique de Montpellier Bel-Air

Number of days during the past 3 years in which the wind blows from a given direction at the Station Bioclimatique de Montpellier Bel-Air

Vent / Année	Nord	Ouest	Sud	Est	Variable
1966	120	91	28	37	89
1967	123	82	41	44	75
1968	130	78	35	39	84

3. RÉCOLTE DES ÉCHANTILLONS SUR LE TERRAIN.

Les résultats portent sur une période d'observation de trois ans à la Madeleine et à Grabels, deux ans à Grabiac et une année au Rouquet. Dans cette dernière station le dispositif expérimental a été modifié au bout d'une année, de façon à étudier, en plus de l'apport par égouttement celui par écoulement le long des troncs. Les résultats obtenus à partir de cette nouvelle installation seront relatés ultérieurement.

Les pluviomètres, au nombre de 5 sous les arbres, de deux à ciel ouvert, étaient en matière plastique, de manière à éviter toute contamination due à leur constitution. Nous les avons laissés à la même position pendant toute la période de mesure, contrairement à certains auteurs qui les changent périodiquement de place (AUSSENAC, 1968). La récolte des échantillons a eu lieu mensuellement ou hebdomadairement selon l'intensité des précipitations.

4. Techniques de dosage.

A leur arrivée au laboratoire les différentes eaux de pluie ont été filtrées sur filtre Durieux à porosité fine puis des aliquotes ont été stockés à l'obscurité en chambre froide. Dans le cas où il y avait plusieurs récoltes par mois, on a conservé des fractions aliquotes de chaque récolte qui ont été réunies à la fin du mois.

Le sodium, le potassium, le calcium et le magnésium ont été déterminés directement par photométrie de flamme; flamme air-butane pour les deux premiers éléments, air-acétylène pour le calcium et mélange hydrogène-oxygène pour le magnésium. A partir de 1968 les deux derniers éléments ont été dosés par spectrophotométrie par absorption atomique.

Le phosphore a été déterminé par colorimétrie en présence de nitrovanado-molybdate d'ammonium. Comme les eaux de pluie récoltées sous couvert étaient colorées, nous avons procédé à une destruction préalable de la matière organique par minéralisation tri-acide (nitro-sulfo-perchlorique), le résidu sec est repris par l'acide nitrique à 2,5 % et la colorimétrie effectuée sur cette solution.

Le dosage de l'azote s'est fait selon la méthode de Kjeldahl. 50 ml d'eau de pluie ont été évaporés à sec dans un évaporateur rotatif sous vide à 45 °C, de manière à éviter toute perte d'azote. Le résidu sec est attaqué par l'acide sulfurique en présence d'un catalyseur, le réactif de WIENINGER, puis distillé. L'ammoniac formé a été titré par l'acide chlorhydrique N/100.

A partir des résultats exprimés en mg par litre et de la hauteur de pluie tombée sur chaque station ou recueillie sous les arbres, on a calculé l'apport mensuel d'éléments en kg/ha.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Apport d'éléments minéraux par les eaux de pluie a découvert.

Pendant la période d'observation les précipitations ont fait bénéficier annuellement chaque station d'un apport de 43 à 58 kg d'éléments minéraux totaux dosés par hectare. Ces valeurs représentent la moyenne des deux, respectivement 3 années de mesure pendant lesquelles la variabilité a été très importante,

TABLEAU 4

Apport au sol d'éléments minéraux par les eaux de pluie récoltées à l'air libre (Kg/Ha/an)

Mineral content of the precipitations in open areas (Kg/Ha/year)

Station	Année	Na	K	Ca	Mg	P	N	Total	
								Na à Mg	Na à N
Madeleine	1966	32,3	2,6	14,7	1,8	0,7	15,1	51,4	67,2
	1967	23,4	2,5	14,5	2,3			42,5	
	1968	12,9	4,3	15,0	2,3	0,7	13,5	34,5	48,7
	m	22,9	3,1	14,7	2,1	0,7	14,3	42,8	57,8
Grabels	1966	30,3	3,6	13,0	2,6	0,7	14,8	49,5	65,0
	1967	14,0	3,6	5,4	0,7			23,7	
	1968	13,0	4,3	12,3	1,8	0,9	14,5	31,4	46,8
	m	19,1	3,8	10,2	1,7	0,8	14,6	34,8	50,2
Rouquet	1966	25,2	2,1	10,3	1,6	0,1	14,7	39,2	53,9
	1967	16,5	2,6	9,3	0,8			29,2	
	1968	26,0	1,4	11,8	2,2	1,9	14,6	41,4	57,9
	m	22,6	2,0	10,5	1,5	1,0	14,6	36,6	52,2
Gabriac	1967	11,0	2,4	11,0	0,3			24,7	
	1968	15,9	5,3	13,5	1,7	1,1	12,4	36,4	49,9
	m	13,4	3,8	11,7	1,0	1,1	12,4	30,0	43,5

surtout à Grabels où la quantité d'éléments varie du simple au double d'une année à l'autre (Tabl. 4).

Ceci s'explique par les fluctuations aussi bien annuelles (Tabl. 2) que saisonnières (Fig. 1) de la pluviométrie. Il est bien connu que les pluies qui succèdent à une période sèche sont plus riches en éléments minéraux que les pluies rapprochées des saisons humides. D'autre part, les pluies fortes et intenses présentent une concentration moindre que les précipitations plus faibles (MADGWICK et OVINGTON, 1959).

L'élément le plus important dans l'eau de pluie est le *sodium*. Ceci est en relation avec la localisation des stations à proximité de la mer. Gabriac, protégé des influences marines par la crête rocheuse du Pic Saint-Loup qui culmine à 600 mètres et qui est orientée sensiblement Est-Ouest, fait exception : les pluies n'y apportent que 13 kg/ha/an de sodium contre 19 à 23 dans les autres stations.

Le *potassium* est en quantité bien moindre. Les eaux de pluie provenant des différents lieux de prélèvement ont une concentration voisine, sauf celles provenant du Rouquet qui présentent toujours une faible teneur en cet élément. Sa proportion par rapport au sodium est beaucoup plus élevée que dans l'eau de mer (Tabl. 5) et augmente lorsqu'on s'éloigne de la Méditerranée.

Par l'intermédiaire des pluies, chaque hectare du sol de nos stations bénéficie chaque année de l'apport de 10 à 15 kg de *calcium*. Ces quantités très élevées, correspondant à une concentration des solutions de 8 à 20 fois supérieure à celle de l'eau de mer, s'expliquent par le paysage calcaire dans lequel sont implantées nos stations. Les pluies fixent et dissolvent une certaine quantité de particules calcaires en suspension dans la basse atmosphère sous forme de poussières et d'aérosols. Ceci est particulièrement le cas à la Madeleine qui est située à proximité immédiate de carrières en cours d'exploitation qui contaminent les alentours. Dans ce cas précis, on a à faire aux « poussières pédogéniques locales » de TAMM (1958) (1).

TABLEAU 5

Proportions relatives des éléments dans l'eau de mer (*) et les eaux de pluie des différentes stations

Ratios of 4 chemical elements to sodium in the sea and in the rainfall at different sites

	Eau de mer*	Madeleine	Grabels	Rouquet	Gabriac
K/Na	0,036	0,125	0,187	0,088	0,263
Ca/Na	0,039	0,625	0,531	0,470	0,842
Mg/Na	0,120	0,085	0,094	0,059	0,052
P/Na	0,000005	0,020	0,031	0,029	0,052

(*) D'après KALLE (1943) in CARLISLE (1966).

Un à deux kilogrammes de *magnésium* sont apportés chaque année dans les différentes localités étudiées. A proximité de la mer, les précipitations en renferment davantage. C'est le seul élément dont la proportion par rapport au sodium est plus faible dans les eaux de pluie que dans l'eau de mer, qui semble ainsi constituer la source essentielle de cet élément. Sa diminution avec l'éloigne-

(1) A Gabriac, nous avions déterminé 20 kg/ha/an de cet élément en 1967 dont 9 contenus dans les pluies de février. Après enquête nous avons appris que durant ce mois, la pelouse sur laquelle sont installés les pluviomètres témoins avait été amendée. Nous avons certainement eu une contamination et nous n'avons pas tenu compte de cette valeur. Cette rectification étant faite, l'apport de calcium est le même à Gabriac qu'à Grabels et au Rouquet.

ment des rivages de la Méditerranée montre qu'il n'y a pas de contamination des pluies à partir des régions continentales. Même les zones à dolomie, assez répandues aux alentours de Montpellier, ne provoquent aucun enrichissement des précipitations en magnésium. Cela s'explique par le fait que ces roches, en se décomposant, fournissent un sable dolomitique à granulométrie grossière.

Le *phosphore* ne se trouve qu'en faible quantité dans l'eau de pluie. Il est à peu près inexistant dans l'eau de mer. Il provient donc essentiellement des poussières atmosphériques.

L'*azote* enfin se trouve en quantité importante dans nos précipitations. Son apport présente une constance remarquable d'un endroit à l'autre ainsi que tout au long de la période d'observation. La Madeleine, Grabels et le Rouquet bénéficient de 14 Kg/Ha/an, Gabriac de 12 seulement.

Comme nous avons dosé l'azote par la méthode de Kjeldahl, nous avons déterminé l'azote organique et ammoniacal, à l'exclusion de l'azote nitrique. Bartholomev et Clark (1965) situent l'apport d'azote minéral (ammoniacal et nitrique) entre 0,7 et 21 Kg/Ha/an (moyenne 4,5 à 8) la fraction ammoniacale représentant les deux tiers. Pour l'azote organique, l'apport moyen se situerait entre 4,5 et 6,5 Kg/Ha/an.

Pour le moment nous n'avons pas trouvé d'explication satisfaisante à ces fortes teneurs en azote. Nous envisageons de faire prochainement une étude plus poussée des différentes fractions de cet élément dans les eaux de pluie.

Tableau 6

Apports d'éléments minéraux par l'intermédiaire des eaux de pluie (Kg/Ha/an)

Mineral contents of rainfall recorded by various authors (Kg/Ha/year)

Auteur	Durée ans	Pluie mm	Na	K	Ca	Mg	P	N	Total Na à Mg	Total Na à N
Carlisle	1	1 616	35,3	3,0	7,3	4,6	0,4	9,5	50,2	60,1
Jensen	4	607	16,1	3,1	6,5	3,0		6,9	28,7	
Madgwick Ovington	2	831	19,3	2,8	9,8	4,2	0,4		35,8	
Miller	3	1 352	59,0	6,6	7,3	11,2	0,2	2,8	84,1	87,1
Will	2	1 600	36,9	3,5	3,0		0,3		43,4	
	1		35,6	5,0	3,0		0,3		43,6	
Rapp	3	477	22,9	3,1	14,7	2,1	0,7	14,3	42,8	57,8
	3	601	19,1	3,8	10,2	1,7	0,8	14,6	36,6	52,2
	3	662	22,6	2,0	10,5	1,5	1,0	14,6	34,8	50,2
	2	709	13,4	3,8	11,7	1,0	1,1	12,4	30,0	43,5

Cet élément mis à part, et compte tenu de la pluviométrie propre à chaque endroit et de certains facteurs géographiques tels la proximité de la mer, ou la nature géologique de la région, les apports que nous avons constatés sont en harmonie avec ceux signalés par d'autres auteurs, et qui sont résumés sur le tableau 6. Ces éléments proviennent de deux sources : la mer pour le sodium et magnésium, la contamination des précipitations par des poussières géologiques, pédologiques ou des déchets industriels pour les autres. ERICKSON (in MILLER, 1961) a noté que les pluies au-dessus de la Scandinavie, donc à l'intérieur des terres, étaient trois fois plus riches en certains éléments que celles recueillies au bord de la mer où la pollution est moins importante.

APPORT AU SOL D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX PAR LE PLUVIOLESSIVAGE.

A l'apport direct aux écosystèmes d'éléments biogènes d'origine externe s'ajoute une source supplémentaire constituée par l'écosystème lui-même.

En effet, les eaux de pluie récoltées sous la couronne des arbres, ou sous un tapis végétal quelconque, ne présentent plus la même composition que les pluies incidentes. On observe généralement dans les eaux récoltées sous couvert une augmentation de la teneur en éléments dissous due au pluviolessivage. C'est cet apport à l'écosystème qui nous intéresse particulièrement ici, plutôt que les mécanismes expliquant l'origine des différents éléments trouvés.

Le tableau 7 donne les quantités d'éléments contenus dans les eaux de pluie qui ont traversé la couronne des arbres. On constate dans l'ensemble qu'elles se sont enrichies, sauf dans un seul cas, celui de l'azote au Rouquet. Le sol bénéficie ainsi, selon la station considérée, d'un apport de 156, 101, 96 et 74 Kg/Ha/an d'éléments minéraux dosés, ce qui correspond à un pluviolessivage respectif de 98, 47, 44 et 30 Kg/Ha/an (Tabl. 8). Les alcalins et les alcalino-terreux étant largement dominants par rapport au phosphore et à l'azote.

C'est encore le *sodium* qui est l'élément le plus important. Il en existe de 1,5 à 2 fois plus que dans les eaux de pluie incidentes (Tabl. 9).

Le *calcium* vient en second lieu, en quantité absolue, le lessivage des couronnes double sa concentration, sauf à Gabriac où cette augmentation est très faible.

La teneur en *potassium* s'accroît le plus. Sous chêne vert, on en trouve 10 à 13 fois plus, sous chêne pubescent 4, et sous pin d'Alep 3 fois plus que dans les pluies à découvert.

Les quantités de *phosphore* et de *magnésium* sont elles aussi doublées sous forêt par rapport à l'air libre.

Pour l'*azote* on observe un enrichissement important (9 Kg/Ha/an) à la Madeleine, moindre à Gabriac et à Grabels (4 et 1 Kg/Ha/an) et par contre une fixation par le couvert au Rouquet (une année d'observation).

TABLEAU 7

Apport total d'éléments minéraux, pluie incidente et eaux de pluviolessivage (Kg/Ha/an)

Mineral elements in the rainwater after passage through the canopy (Kg/Ha/year)

Station	Année	Na	K	Ca	Mg	P	N	Total	
								Na à Mg	Na à N
Madeleine	1966	61,8	27,8	33,8	6,5	3,9	27,0	129,9	160,8
	1967	41,8	42,6	31,8	7,8			124,0	
	1968	25,1	51,7	48,2	6,5	3,8	20,8	131,5	156,1
	m	42,9	40,7	37,9	6,9	3,8	23,9	128,4	156,1
Grabels	1966	52,0	15,9	20,7	4,4	0,9	16,6	93,0	110,5
	1967	36,8	8,6	17,4	4,2			67,0	
	1968	29,9	13,9	27,1	4,7	1,9	14,9	75,6	92,4
	m	39,6	12,8	21,7	4,4	1,4	15,7	78,5	95,6
Rouquet	1966	34,1	21,3	26,3	2,7	2,1	14,2	84,4	100,7
Gabriac	1967	20,9	13,9	12,3	3,0			50,1	
	1968	24,6	19,1	14,4	3,9	1,3	16,5	62,0	79,8
	m	22,7	16,5	13,3	3,4	1,3	16,5	55,9	73,7

TABLEAU 8

Quantité d'éléments pluviolessivés en Kg/Ha/an

Difference in the mineral composition between the incident rain and the rainwater after passage through the canopy (Kg/Ha/year)

Station	Durée ans	Na	K	Ca	Mg	P	N	Total	
								Na à Mg	Na à N
Madeleine	3	20,0	38,2	23,2	4,8	3,1	9,6	86,2	98,9
Grabels	3	20,2	8,0	11,6	2,7	0,6	1,1	42,5	44,5
Rouquet	1	8,9	19,2	16,0	1,1	2,0	−0,4	45,2	46,7
Gabriac	2	9,3	12,7	1,1	2,4	0,2	4,1	25,5	29,8

Dans l'ensemble, et en tenant toujours compte des facteurs locaux auxquels s'ajoute la nature de la végétation, nos résultats concernant les quantités d'éléments pluviolessivés sont eux aussi en accord avec ceux cités dans d'autres travaux ayant trait au même sujet.

TABLEAU 9

Facteurs d'enrichissement des eaux de pluie sous couvert forestier
The proportional enrichment of the rainwater after passage through the forest canopy

	Madeleine	Rouquet	Grabels	Gabriac
Na	1,9	1,3	2,1	1,7
K	13,1	10,0	3,4	4,3
Ca	2,6	2,5	2,1	1,4
Mg	3,3	1,7	2,6	3,4
P	5,4	12,0	1,7	1,2
N	1,7		1,1	1,3

ORIGINE DES ÉLÉMENTS PLUVIOLESSIVÉS.

Deux hypothèses ont été avancées pour expliquer le phénomène :

1°) Il s'agirait d'une libération d'éléments minéraux à partir des feuilles : c'est la théorie de la « récrétion » (1).

2°) Il y aurait un dépôt de poussières atmosphériques sur la végétation suivi d'un entraînement au moment des pluies.

Comme nous avons déjà eu l'occasion de le signaler, l'étude des mécanismes du pluviolessivage n'est pas le but primordial de ce travail. Nous nous contenterons d'appliquer les deux hypothèses aux éléments dosés et aux observations effectuées.

Le *potassium* est l'élément qui subit la plus forte augmentation sous l'effet du pluviolessivage. Ce fait est général et a été constaté par tous les auteurs qui se sont intéressés à la question. Pour notre part, en comparant en 1966, les deux stations de chêne vert, à la station de pin d'Alep, nous remarquons que le lessivage de cet élément est quantitativement plus important dans les deux permières, et s'y produit à des périodes identiques, qui ne sont pas les mêmes sous pin d'Alep (Fig. 2). Le maximum de potassium arrive au sol en mai et octobre, ce qui correspond aux périodes de chute de feuilles anciennes et de poussée de jeunes feuilles. Pendant ces périodes la sortie de cet élément très mobile est facilitée, semble-t-il, pour deux raisons : les feuilles étant mortes ou ayant un métabolisme ralenti pendant une certaine période avant qu'elles ne se détachent, libèrent plus facilement leurs éléments constitutifs. Les microorganismes qui les envahissent vraisemblable-

(1) On désigne sous ce terme la sortie d'éléments minéraux, en réservant celui de « sécrétion » à l'élimination de produits organiques d'assimilation (FREY-WISSLING 1935 in DENAEYER DE SMET 1962).

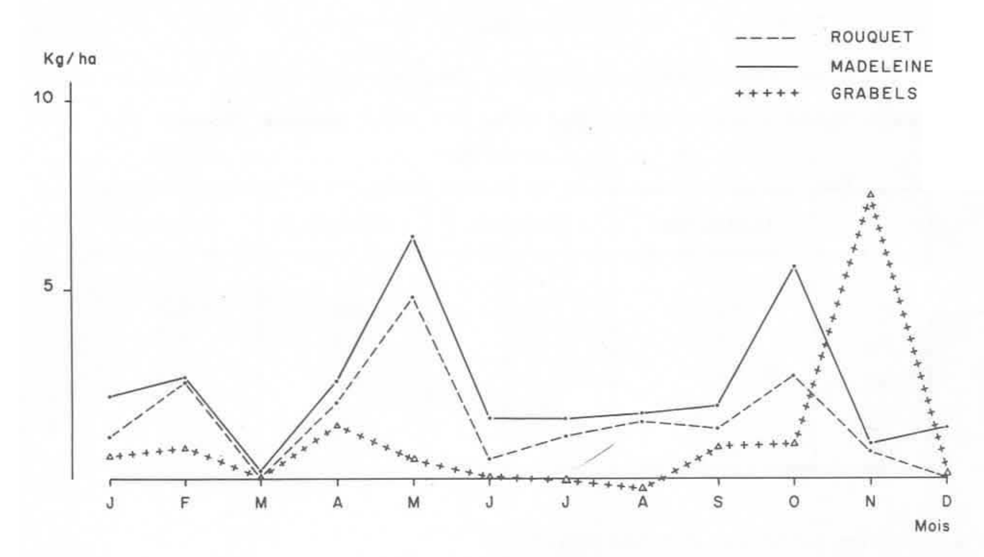


FIG. 2. — Variation mensuelle du lessivage du potassium pendant l'année 1966.
The monthly variation in the leaching of potassium during 1966.

ment avant leur chute y contribuent certainement aussi. Nous avons pu montrer que lors de la décomposition *in vitro* de différentes litières, le potassium est l'élément le plus facilement libéré (RAPP, 1967). Une seconde raison pourrait être une récrétion plus importante à partir des jeunes feuilles dont la cuticule est encore peu épaisse.

Les quantités importantes de potassium lessivées à la Madeleine (Tabl. 8) sont le résultat d'un apport de cet élément par les excréments des nombreux oiseaux qui fréquentent le bois.

Par contre la présence en forte quantité de cet élément dans l'atmosphère serait plus difficile à expliquer. On peut donc admettre que nous avons à faire là à un mécanisme de récrétion. Le fait, signalé par DENAEYER DE SMET (1962), que la teneur en potassium des feuilles ne varie pas avant et après une précipitation ,peut s'expliquer par la grande mobilité de cet élément et son remplacement rapide. Il ne s'oppose pas formellement à l'hypothèse d'une sortie de potassium des feuilles.

Pour les autres éléments étudiés dans ce travail, l'hypothèse du dépôt de poussières atmosphériques est bien plus probable et permet d'expliquer facilement l'origine des éléments pluviolessivés.

Tous sont libérés en quantité variable d'une station à l'autre et il n'y a aucune relation entre les deux bois de chêne vert et celui de pins, sauf que les premiers présentent souvent un lessivage plus important (fig. 3, cas du calcium). Cela est certainement la conséquence de la morphologie de leurs appareils foliaires : les

feuilles ont une surface plus grande que les aiguilles, donc une possibilité de captation des poussières atmosphériques plus élevée. Les grandes quantités de calcium lessivées à la Madeleine s'expliquent par ce mécanisme. A cet endroit une poussière fine, riche en calcaire, due à la proximité de carrières, recouvre toute la végétation. A Gabriac par contre, le problème de l'absence de cet élément n'est pas encore élucidé. Nous avons vu que les pluies incidentes y apportent autant de calcium qu'à Grabels ou au Rouquet, bien que sa concentration soit plus faible (la pluviosité étant la plus importante à cette station). Donc il y a des suspensions calcaires dans l'air qui sont susceptibles d'être entraînées par les précipitations, à moins qu'elles ne soient apportées avec les pluies elles-mêmes. Trois faits peuvent être avancés pour expliquer l'absence de dépôt de calcium sur la végétation : la station étant abritée par le Pic Saint-Loup, l'action éolienne locale est peu intense; cette action, si elle existe, s'applique sur un sol passablement décalcifié, les poussières pédogéniques renferment donc peu de cet élément; enfin, le fait d'avoir à faire à une essence à feuilles caduques entraîne une diminution sensible de la surface de piégeage pendant la phénophase défeuillée qui dure en moyenne de 3 à 4 mois.

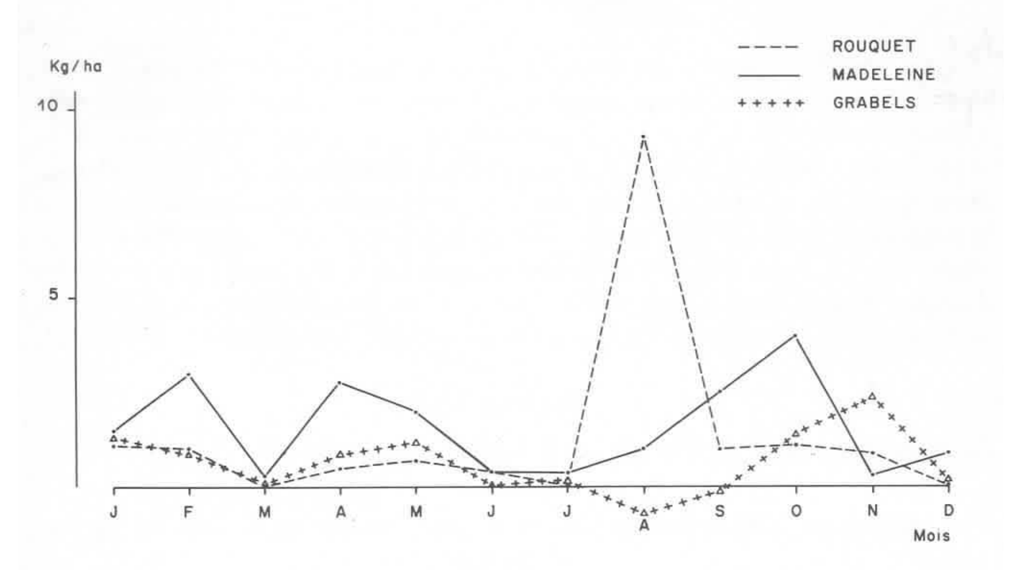


FIG. 3. — Variation mensuelle du lessivage du calcium pendant l'année 1966.
The monthly variation in the leaching of calcium during 1966.

En ce qui concerne l'*azote* au Rouquet, sa diminution par rapport aux eaux incidentes, est difficile à expliquer. Nous ne savons pas si nous nous trouvons en présence d'un phénomène particulier à cette station, ou propre au chêne vert. La comparaison avec la Madeleine s'avère impossible, les résultats de cette dernière station étant encore faussés à cause des excréments d'oiseaux. Signalons à

ce sujet que Carlisle (1966) a constaté une fixation d'azote par le feuillage de *Quercus petraea* Liebl. Il avance trois hypothèses pour l'expliquer :

— Il s'agit d'une absorption directe d'azote organique ou minéral à travers la cuticule foliaire.

— Il ne s'agit que d'une adsorption sur la surface des feuilles, suivie d'une utilisation des produits adsorbés par les microorganismes qui y vivent.

— Les mousses, lichens et autres épiphytes occupant les branches et les rameaux consommeraient une certaine fraction des éléments nutritifs contenus dans les pluies.

Le cas du sodium, que nous allons étudier maintenant, est un autre exemple qui illustre parfaitement les mécanismes de la deuxième conception.

Relation entre la teneur en sodium des eaux météoriques avant et après passage a travers la frondaison des arbres et la localisation géographique des stations.

La teneur en sodium des eaux de pluie diminue lorsqu'on pénètre à l'intérieur des terres, tout en restant toujours très élevée, nos stations étant toutes relativement proches de la mer. Pour comparer les quatre sites d'observation, nous avons ramené l'apport de sodium à une hauteur identique de pluie, soit 10 mm. Dans ce cas on constate qu'à l'air libre, on a un apport de 479 g à l'hectare à la Madeleine, contre 317 à Grabels, 332 au Rouquet et 189 seulement à Gabriac (Tabl. 10). Ce dernier lieu est donc bien protégé par le Pic Saint-Loup des pluies d'origine marine, et doit être plutôt soumis à des précipitations d'origine continentales, ce qui se confirme par les hauteurs de pluie plus grandes à cet endroit.

Tableau 10

Quantité de sodium apporté par an et par hectare en mg pour 10 mm de pluie incidente

The amount of sodium (in mg) added to each hectare each year by 10 mm of rainfall

Station	Madeleine	Grabels	Rouquet	Gabriac
Distance à la mer (km)	4	17	25	37
Sous arbre	898	658	501	320
A découvert	479	317	332	189
Différence	419	341	169	131

Le sodium pluviolessivé n'est dû, ni à la pluie elle-même, puisqu'il augmente sous les arbres, ni à une éventuelle récrétion, car il n'existe qu'en très faible quantité dans les végétaux. Nous devons donc nous trouver en face d'un dépôt, qui est entraîné lors des précipitations.

On peut facilement expliquer l'origine de ce dépôt, qui diminue avec l'éloignement de la mer, en faisant appel à quelques données propres à la région.

1. Il existe dans le Languedoc un vent du sud, dénommé localement « le marin » qui est certainement le pourvoyeur de sodium qui y est en suspension sous forme de ClNa.
2. La Madeleine étant à proximité immédiate de la mer bénéficie du plus grand apport, auquel vient se surajouter un apport à partir des salins de Villeneuve qui sont à moins d'un kilomètre de la station.
3. Les pins d'Alep de Grabels sont situés à une altitude de 100 m, sur le versant ouest de la vallée de la Mosson, dont l'axe est sensiblement nord-sud et par là n'oppose aucune résistance à la pénétration du « marin ».
4. Le Rouquet, bien qu'éloigné seulement de quelques kilomètres de Grabels, se trouve dans une cuvette dont les rebords se situent légèrement au-dessus de 200 m.
5. Gabriac enfin, distant de 37 km de la mer, est à l'abri de la barrière rocheuse du Pic Saint-Loup qui s'élève à 600 m.

On peut donc admettre que le vent « marin », chargé de chlorure de sodium, ne rencontre aucun obstacle topographique avant Grabels (la diminution notée entre cette station et la Madeleine étant simplement le résultat de la distance parcourue, de la morphologie des essences lessivées, ou de la proximité des salins), puis abandonne progressivement ses suspensions à mesure que les obstacles topographiques deviennent plus importants.

Les éléments recueillis sous les arbres résultant du lessivage de dépôts préalables ont donc une origine double : la formation et l'entraînement par les vents de poussières plus ou moins locales (cas du calcium) contaminant les environs, l'apport avec les vents d'éléments fins en suspensions, dont l'origine se situe souvent à de grandes distances du lieu de dépôt.

L'ÉQUILIBRE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DANS L'ÉCOSYSTÈME.

Par leur composition initiale, et par l'action du pluviolessivage, les précipitations représentent pour le sol des groupements étudiés une importante source d'éléments biogènes, surtout en sodium et calcium, moindre en azote, magnésium et phosphore.

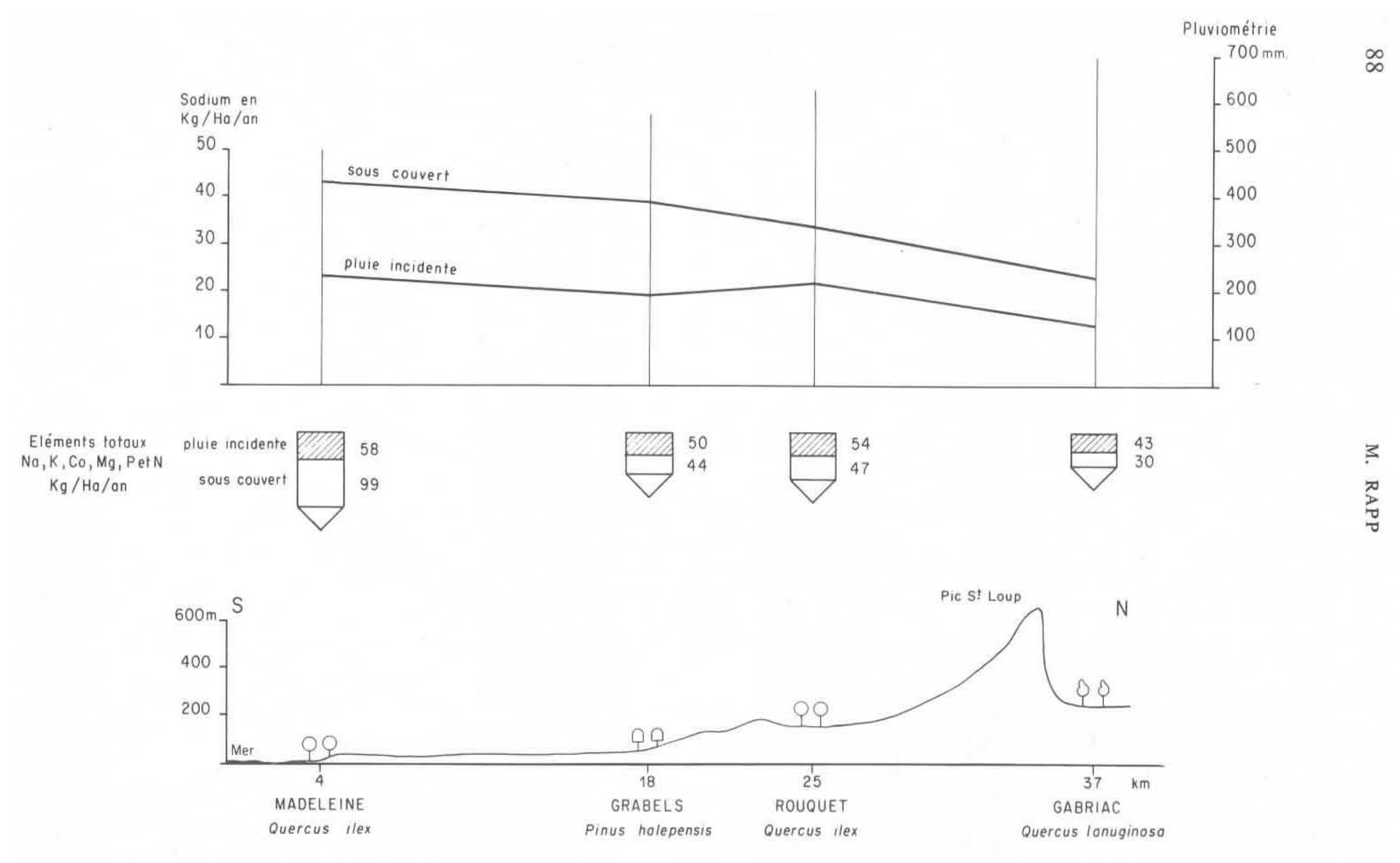


FIG. 4. — Variation de l'apport et du lessivage des élémentx minéraux totaux et du sodium en fonction de la localisation des stations par rapport à la mer.

The variation at various sites, in the amounts of all the mineral elements, and the variation in sodium level before and after passage of rainwater through the canopy, in relation to their distance from the sea.

Le potassium tient une place particulière, car on a plutôt à faire à une circulation constante de cet élément à travers les différents composants de l'écosystème, qu'à un apport externe à partir du milieu atmosphérique.

Nous pouvons comparer l'apport au sol d'éléments minéraux pendant l'année 1966, à la fois par les eaux de pluie et les litières en ce qui concerne la station du Rouquet (Tabl. 11). Sur le même tableau 11, nous mentionnons la quantité des mêmes éléments stockés dans le substrat édaphique, ainsi que la fraction constituant les bases échangeables.

TABLEAU 11

Station du Rouquet. Eléments minéraux arrivant au sol par l'intermédiaire de la pluie et des litières en 1966 (Kg/Ha/an) et stock d'éléments dans la terre fine des vingt premiers centimètres du sol (Kg/Ha)

The amounts of the various mineral elements returning to the soil with litter-fall and passage of rain through the canopy at Rouquet during 1966 (Kg/Ha/year) and the amounts of the same elements in the first 20 centimeters of soil (Kg/Ha)

		Na	K	Ca	Mg	P	N
Apport	Litière	1,4	29,3	93,6	7,8	4,9	57,6
	Pluie	34,1	21,3	26,3	2,1	2,1	14,2
	Total	35,5	50,6	119,9	9,9	7,0	71,8
Sol 0–20 cm	Echangeable	29	644	17 199	321		
	Réserve	710	24 160	11 068	9 677		
	Total	739	24 804	28 267	9 998	1 588	5 096

Pendant cette année d'observation, les litières représentent une source d'éléments biogènes plus importante que les eaux météoriques. Par leur intermédiaire le sol bénéficie de 4 fois plus de calcium, de magnésium et d'azote, de 2 fois plus de phosphore et de 0,5 fois plus de potassium que par les précipitations. Ces dernières par contre sont responsables d'un grand apport de sodium.

Les valeurs obtenues sont proches de celles indiquées par WILL (1959), dans un peuplement de *Pinus radiata*.

Quel est le devenir de ces éléments dans le sol ? Nous constatons que sur une profondeur de 20 cm, le sol du Rouquet est bien pourvu en bases, le complexe absorbant est entièrement saturé. Les quantités arrivant au sol par le pluviolessivage représentent un apport minime et n'interviennent pas sur le complexe. Leur rôle est surtout important par le fait que ces cations sont à l'état dissout, donc facilement dispersés dans le sol et rapidement repris par les racines et recyclés

dans l'écosystème. Même le sodium, qui arrive en quantité supérieure à celle fixée sur le complexe, est en concentration trop faible pour qu'un échange puisse se faire avec les autres ions du complexe absorbant du sol. Comme sa reprise par la végétation elle-même est peu importante, vu la faible teneur en sodium du tissu végétal, il doit être lessivé rapidement hors du profil.

CONCLUSIONS

Des observations de durée variable, allant de 1 à 3 ans, montrent que les sols de quatre peuplements forestiers, deux de chêne vert, un de chêne pubescent et un de pin d'Alep bénéficient annuellement d'un apport respectif de 156, 101, 73 et 95 Kg/Ha de sodium, potassium, calcium, magnésium, phosphore et azote par l'intermédiaire des précipitations.

Les eaux météoriques apportent directement 58, 52, 43 et 50 Kg/Ha de ces éléments et captant le reste pendant qu'elles traversent la frondaison des arbres.

Pondéralement le sodium est l'élément le plus important dans les précipitations incidentes, suivi dans l'ordre par l'azote, le calcium, le potassium, le magnésium et le phosphore. Sous les arbres, si le sodium occupe toujours la première place, il est suivi du calcium, du potassium et de l'azote qui sont en quantités voisines, le magnésium et le phosphore venant en dernier lieu.

Les produits recueillis en plus sous la couronne des arbres proviennent essentiellement de dépôts de poussières atmosphériques sur la végétation qui sont entraînées au moment des précipitations : c'est le phénomène du pluviolessivage.

Un seul élément, le potassium, semble avoir une autre origine : les arbres eux-mêmes, qui par leurs feuilles excrètent cet ion. Nous avons à faire à un phénomène de « récrétion » foliaire, suivi d'un lessivage.

Nous constatons aussi une relation entre la teneur en sodium des eaux de pluie, le dépôt de cet élément sur la végétation, et la localisation des lieux de prélèvement. Lorsqu'on s'éloigne de la mer, la quantité de sodium contenue dans les pluies, ou pluviolessivée, diminue régulièrement.

Pour le sol, le pluviolessivage constitue une source d'éléments minéraux qui complète ceux fournis par la retombée annuelle de litière. Son importance par rapport à la réserve totale du sol, est moins quantitative que qualitative. Ces éléments sont à l'état dissout, donc rapidement mélangés à la solution du sol et facilement repris par les racines pour être intégrés dans le cycle biogéochimique des écosystèmes.

Cet apport constitue un gain pour le sol et l'écosystème, car leur origine est externe au groupement, exception faite du potassium qui manifeste une grande mobilité entre les différents composants de l'écosystème.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec la collaboration technique de M. J. PRIOTON, responsable de l'installation, de l'entretien et des relevés des pluviomètres et de Mlle F. JEGOU qui a effectué les analyses chimiques des eaux de pluie. Qu'il me soit permis de leur exprimer ici toute ma reconnaissance.

BIBLIOGRAPHIE

1. AUSSENAC G., 1968. — Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sci. forest.*, **25**, n° 3, 135-156.
2. BARTHOLOMEV W.V., CLARK F.E., 1965. — Soil Nitrogen. Amer. Soc. of Agric. Madison Wisconsin U.S.A. 615 pp.
3. BLOOMFIELD C., 1964. — Organic matter and soil dynamics. *Experimental Pedology.* Hallsworth - Crawford Ed., Butterworths, London, 1965, 257-266.
4. CARLISLE A., BROWN A.H.F., WHITE E.J., 1966. — The organic matter and nutrient elements in the precipitation beneath a sessile oak canopy. *J. Ecol.*, **54**, n° 1, 87-98.
5. DENAEYER DE SMET S., 1962. — Contribution à l'étude du pluviolessivage du couvert forestier. *Bull. Soc. Royale de Bot. de Belgique*, **94**, 285-308.
6. DENAEYER DE SMET S., 1966. — Bilan annuel des apports d'éléments minéraux par les eaux de précipitation sous couvert forestier dans la forêt mélangée caducifoliée de Blaimont. *Bull. Soc. Royale de Bot. de Belgique*, **99**, 345-375.
7. ECKARDT F.E., 1967. — Mécanisme de la production primaire des écosystèmes terrestres sous climat méditerranéen. Recherches entreprises à Montpellier dans le cadre du P.B.I. *Oecol. Plant.*, **2**, n° 4, 367-397.
8. GRUNERT F., 1964. — Der Biologische Stoffkreislauf in Kiefern Buchen Mischbeständen und Kiefernbeständen. *Albrecht Thaer Archiv*, **8**, nos 6-7, 435-452.
9. LOSSAINT P., 1967. — Etude intégrée des facteurs écologiques de la productivité au niveau de la pédosphère en région méditerranéenne dans le cadre du P.B.I. Programme et description des stations. *Oecol. Plant.*, **2**, n° 4, 341-366.
10. MADGWICK H.A.I., OVINGTON J.D., 1959. — The chemical composition of precipitation in adjacent forest and open plots. *Forestry*, **32**, n° 1, 14-22.
11. MILLER R.B., 1961. — The chemical composition of rainwater at Taita New Zealand 1956-1958. *N.Z.J. Sci.*, **4**, 844-853.
12. MINA V.N., 1966. — Leaching of certain substances by precipitation from woody plants and its importance in the biological cycle. *Soviet S. Sci.*, **6**, 609-617.

13. OVINGTON J.D., 1954. — A comparison of rainfall in different woodlands. *Forestry,* **27,** n° 1, 41-53.

14. RAPP M., 1967. — Etude expérimentale de la libération d'éléments minéraux lors de la décomposition de litières d'essences méditerranéennes. *C.R. Ac. Sci. Paris,* **264,** 757-800.

15. RAPP M., 1967. — Production de litière et apport au sol d'éléments minéraux et d'azote dans un bois de pins d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). *Oecol. Plant.,* **2,** n° 4, 325-338.

16. RAPP M., ROMANE F., 1968. — Contribution à l'étude du bilan de l'eau dans les écosystèmes méditerranéens. 1°) Egouttement des précipitations sous des peuplements de *Quercus ilex L. et de Pinus halepensis* Mill. *Oecol. Plant.,* **3,** n° 4, 271-284.

17. TAMM C.O., 1951. — Removal of plant nutrients from the canopy by rain. *Physiol. Plantarum,* **4,** 184-188.

18. TAMM C.O., 1958. — The atmosphere. *Handbuch der Pflanzenphysiologie,* **4,** 233-242.

19. WILL G.M., 1955. — Removal of mineral nutrients from the tree crowns by rain. *Nature,* **176,** 1180.

20. WILL G.M., 1959. — Nutrients return in litter and rainfall under some exotic conifer stands in New Zealand. *N.Z.J. Agric. Res.,* **2,** n° 4, 719-734.